鋼板の絞り現象を利用した熱間連続幅制御方法の提案*

芝 田 京 子** 中 嶋 正 人*** 川 口 忠 雄†

Proposal on High-temperature Continual Width Control Method Using The Diaphragm Phenomenon
on A Steel Plate Manufacturing Process

Kyoko SHIBATA, Masato NAKASHIMA and Tadao KAWAGUCHI

This paper describes the new width control system that utilized the diaphragm phenomenon seen in the heat treatment process of a steel plate manufacturing process. This system derives the creep composition formula under the high temperature condition of a steel plate, designs each control system which constitutes a system and verified the possibility of this new width control system by computer simulation (1/10 scale). As a result of examining the capability of the equipment and investigating the change action of width by a numerical simulation, following result is obtained that width control is realizable on calculation. By this system, the improvement in manufacture efficiency and large cost reduction are expected since width change can carry out easily and sharply.

Key words: high-temperature continual width control method, diaphragm phenomenon, creep composition formula, computer simulation, large cost reduction

1. 緒 言

帯状金属(以下鋼板)はその用途により数種の板厚板幅が必要とされる。通常鋼板の製造工程には圧延工程が含まれ、鋼板の厚さについては圧延工程の操業条件により任意の寸法にすることは比較的容易であり、多くの研究がなされている^{1)~3)}。しかし鋼板の幅については、任意に調節制御する手法はこれまで検討されていない。このため板幅についてはその製品工程において、原材料である鋼片(以下スラブ)を目標とする製品幅より若干広い数種の幅に圧延し、その後目標幅に切断処理する方法がとられている。このように製造工程において板幅が異なると、板幅に応じて、例えば圧延ロールの種類、圧下力をはじめとして様々な工程でその操業条件を変更する必要がある。さらに多種類の板幅の鋼板を効率よく製造すること、及びストリップエッジによる各種ロールの損傷を防止するために、板幅ごと(通常幅の広い順)に製造順を定める必要があることなど、板幅変更に伴い直接的、間接的に作業効率低下、及び製造コスト上昇に大きな影響を受けている。このような問題を避けるために、統一板幅のスラブを製造し最終工程で幅方向に切断して任意の幅の製品を得る方法もあるが、この場合スラブ幅と製品幅の差が大きくなり、切断部発生による歩留の低下が大きくなるために、製造コストを最低に保つには微小な幅変化にしか適用できない。

以上の問題点を解決するため本研究では、任意の幅の製品を製造する新しいプロセスを提案する。まず、途中工程までは統一幅にて製造する。これは、多数幅を有する鋼板の製造において、板幅変更によって製造コスト及び効率が左右されるためで

ある。次に、最終に近い工程にて板幅の調節制御を行う。

本稿で提案するプロセスにおいては、絞り現象を利用する。これは、連続焼鈍酸洗ラインなど鋼板の熱処理プロセスにおいて生じる異常張力によって鋼板の幅が減少する現象のことであり、これにより大幅な幅変化を目指す。よって鋼板を任意の温度にまで加熱することができる加熱部と、鋼板に張力を掛けることができる張力印加部を有する設備を考える必要があるが、実機での検証は困難であるためシミュレーションにてその妥当性を検討した。

2. 提案する熱間連続幅制御方法の特徴

本稿で提案している熱間連続幅制御システムは、前述のように、鋼板に降伏応力以上の張力を加えた場合、伸びが生じるとともに板厚、板幅が減少する絞り現象を利用するものである。鋼板に張力を印加、増加させていく場合、最初は弾性変形を行い、次いで内部応力が降伏条件を越えた時点から塑性変形を開始する。このとき、鋼板に加える張力の大きさ及び張力印加時間と、塑性変形諸量(伸び、幅減少、厚み減少)との間に一定の関係が存在することは良く知られている。すなわち、塑性変形諸量を調節することが可能である。この絞り現象を利用して、従来、鋼板の熱間圧延工程において張力の変化により微細な板

Fig. 1 Creep curve of several cases (log scale)

* 原稿受付 平成 18 年 3 月 22 日

** 正 会 員 高知工科大学 (高知県香美市土佐山田町)

*** 成蹊大学大学院工学研究科 (現, 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所; 北海道室蘭市仲町 12 番地)

† 正 会 員 成蹊大学工学部 (現, ウィルネット(株)東京都港区高輪 1-5-4 常和高輪ビル 8F)

幅調節(2~3% 程度)を行う試みがなされている^{9~11)}が、このような方法では本プロセスで目的とするような大幅な板幅調節(20% 程度)を行うことは困難である。

スラブの変形特性をも系内に含んだ制御系を考えなくてはならない。そこで、クリープ試験機を用いて、一定張力下における伸び歪(あるいは、幅減少)の過渡特性を調べる。図1に、一定温度下で一定張力を印可した場合の鋼板の伸び歪量の時間変化を示す。時間、伸び歪量は共に対数軸で表し、曲線1,2,...,6の順に温度が高いときの結果を示す。低温度(曲線1,2)では張力印加後はじめのうちは歪が増加するが、一定時間後には一定値に収束する。この定歪条件下での伸び歪収束値は印加張力により変化するため、張力のみによる伸び歪の制御、即ち幅の制御が可能である。しかし曲線2から3と温度が上昇すると伸び歪の増加が著しくなり、また伸びの明確な収束が見られなくなる。さらに高温になると曲線4のように伸び増加率の漸減が見られなくなり、さらに曲線5から6になると伸び増加率が時間と共に加速度的に増大して行く傾向になる。なお、曲線1,2のように伸び歪が一定値に収束する条件下においてさらに大きな張力を加えた場合、伸び歪が大きくなると共に曲線3あるいは4のように収束が見られなくなる。

従来実施されていた板幅制御はいずれも、図1の曲線1,2のように、伸び歪が安定に収束する条件下における張力のみによって、伸び歪量、あるいはこれと一定の関係を有する幅歪量を調節するものであった。これに対し本稿で提案する大幅な幅調節では、材料温度の上昇、及び張力の増大により、図1の曲線4,5,6のように伸び歪が収束しない条件下においても調節制御を行う必要がある。このような条件下では、張力印加後伸び歪は急激に増加するので、張力印加による材料伸び、もしくは板幅の調節には非直線性が含まれるため、従来これを一定に制御する手段がなかった。そこで、図1に示したように張力印可時に伸び歪に伴って鋼板の幅が連続的に変化すること、また、この伸び、あるいは幅の変化は材料の温度降下によって図1の曲線1,2のように伸び歪の変化量を収束させられることに着目し、上述の問題点を解決することとした。

つまりこのプロセスの第1の特徴は、鋼板の幅調節制御に必要な張力を十分小さくするため、鋼板の温度を高温に保つ加熱保温部と、高温下で進行する幅の縮小を目標幅で停止させるための鋼板冷却部とを設置する点にある。そして加熱保温部及び冷却部はいずれもプロセスライン中の鋼板に任意の張力を付加できる張力制御域に設置する。

第2の特徴は、材料が高温で通過するラインの長さ、即ち加熱開始点から冷却開始点までのライン長さを可変とすることができる冷却開始点制御設備を備える点にある。これにより、鋼板上各点に対して独立に幅の制御を行うことが可能となり、従来行われた張力、または伸び率による制御では達成できない大幅な幅調節が可能となる。

また第3の特徴は、鋼板の材質の変動その他による幅変化特性の変動を抑制するために、加熱保温部内に板幅測定装置を設け、材料上の測定点の目標板幅到達位置を予測する点にある。前述した冷却開始位置は、この目標板幅到達位置予測値にしたがって制御される。

以上に述べた特徴を鋼板の熱処理プロセスの実施例に基づいて詳細に説明する。

3. 熱間連続幅制御システムの実施例⁹⁾

鋼板の幅制御前の素材幅を W_0 、幅調節制御開始点後の距離 x での板幅を $W(x)$ 、幅歪を $\varepsilon_w(x)$ 、目標板幅を W_r 、目標幅歪を ε_{wr} とすれば、

$$\varepsilon_w(x) = W(x)/W_0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{wr} = W_r/W_0 \quad (2)$$

となる。鋼板の単位断面積あたりの張力 T を印可した後の鋼板の幅歪特性 ε_w は次式で示される。

$$\varepsilon_w = f(T, t, \theta) \quad (3)$$

ここで t は幅調節開始後の時間[sec]、 θ は鋼板の温度[°C]である。式(3)における関数 f は、鋼板の温度 θ 、張力 T をパラメータとする時間関数として予め実験的に定めることができる。幅歪 ε_w と伸び歪 ε_l の関係は

$$\varepsilon_l = g(\varepsilon_w) \quad (4)$$

として予め決定できる。式(3)及び式(4)より T 、 θ を固定すれば

$$\varepsilon_l = g(f(T, t, \theta)) = h(t) \quad (5)$$

と表現できる。鋼板上の一定点の幅調節制御開始後 t 秒後の到達位置 x は、張力 T 、温度 θ が変わらない定常時を考えれば、鋼板速度を v として、次式により計算できる。

$$x = \int_{t=0}^t h(t+\tau) v d\tau \quad (6)$$

前章で述べたクリープ試験において、伸び歪の変化量が収束する図1の曲線1,2の温度範囲では、 k_1 、 k_2 を定数として、幅歪を次の近似式として置くことができる。

$$\varepsilon_w = k_1 \cdot t + k_2 \quad (7)$$

ここで、図1の曲線1,2の範囲で考えているのは前述したように、本プロセスでは伸び歪が収束しない条件下(図1の曲線4,5,6)においても、冷却部の設置により温度を降下させることを可能としているためである。

よって定数 k_w を用いて伸び歪は

$$\varepsilon_l = g(\varepsilon_w) = k_w \cdot \varepsilon_w = k_1 \cdot k_w \cdot t + k_2 \cdot k_w \quad (8)$$

となるので、式(6)より x は以下のように求められる。

$$x = \frac{1}{2} k_w \cdot k_1 \cdot v \cdot t^2 + k_w \cdot k_2 \cdot v \cdot t \quad (9)$$

式(8)、(9)に従い $x=x_1$ 、 $x=x_2$ の2点で幅歪 ε_{w1} 、 ε_{w2} をそれぞれ測定したとすると、これからパラメータ k_1 、 k_2 を得ることができる。

$$k_1 = \frac{\varepsilon_{w1}^2 - \varepsilon_{w2}^2}{x_1 - x_2} \quad (10)$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{x_1 \cdot \varepsilon_{w2}^2 - x_2 \cdot \varepsilon_{w1}^2}{x_1 - x_2}} \quad (11)$$

また、式(9)より

$$t = \frac{-k_w \cdot k_2 \cdot v + \sqrt{(k_w \cdot k_2 \cdot v)^2 - 2k_w \cdot k_1 \cdot v \cdot x}}{2 \cdot k_w \cdot k_1 \cdot v} \quad (12)$$

であるので、幅調節開始位置からの x_1 、 x_2 に達するまでの時間 t_1 、 t_2 は

$$t_1 = -\frac{1}{2(\varepsilon_{w1}^2 - \varepsilon_{w2}^2)} \sqrt{(x_1 - x_2)(x_2 \cdot \varepsilon_{w1}^2 - x_1 \cdot \varepsilon_{w2}^2)} + \frac{\sqrt{x_1 - x_2}}{2(\varepsilon_{w1}^2 - \varepsilon_{w2}^2)} \sqrt{(x_1 \cdot \varepsilon_{w2}^2 - x_2 \cdot \varepsilon_{w1}^2) - \frac{\varepsilon_{w1}^2 - \varepsilon_{w2}^2}{k_w \cdot v} x_1} \quad (13)$$

$$t_2 = -\frac{1}{2(\varepsilon_{w1}^2 - \varepsilon_{w2}^2)} \sqrt{(x_1 - x_2)(x_2 \cdot \varepsilon_{w1}^2 - x_1 \cdot \varepsilon_{w2}^2)} + \frac{\sqrt{x_1 - x_2}}{2(\varepsilon_{w1}^2 - \varepsilon_{w2}^2)} \sqrt{(x_1 \cdot \varepsilon_{w2}^2 - x_2 \cdot \varepsilon_{w1}^2) - \frac{\varepsilon_{w1}^2 - \varepsilon_{w2}^2}{k_w \cdot v} x_2} \quad (14)$$

となる。式(13)、(14)より冷却開始時間 t_c は式(15)となる。

Fig. 2 The outline figure of high-temperature continual width control system

Fig. 3 The example of installation of a width control system

$$t_c = t_2 - t_1$$

$$= \frac{\sqrt{x_1 - x_2}}{2(\varepsilon_{w1}^2 - \varepsilon_{w2}^2)} \left\{ \sqrt{\left(x_1 - \frac{x_2}{k_w \cdot v}\right)(\varepsilon_{w2}^2 - \varepsilon_{w1}^2) + (x_1 - x_2)\varepsilon_{w1}^2} \right. \\ \left. - \sqrt{\left(x_2 - \frac{x_1}{k_w \cdot v}\right)(\varepsilon_{w2}^2 - \varepsilon_{w1}^2) + (x_1 - x_2)\varepsilon_{w2}^2} \right\} \quad (15)$$

現実の操業下では k_1 , k_2 に変動があると考えられるが, 式(7)~(15)より, 予め定められた k_1 , k_2 を元に幅歪の測定値 ε_{w1} , ε_{w2} を使って実際の k_1 , k_2 を補正しながら冷却開始位置 x_c を制御することができ, よって, 目標板幅への調整制御が可能となる。

次に, 本システムを実現するための具体的な制御装置例を図2に基づいて説明する。制御方法は, まず張力印加部の前段に加熱設備を設置し, 幅制御可能な予め実験的に定められた所定温度まで鋼板を昇温し保持する。次に, 駆動装置 P_1 により定速度制御が, 駆動装置 P_2 により一定張力制御が行われる。ここで, 駆動装置 P_2 の後段に設置された幅計の検出値と, 総括制御装置(図中左下)により決定される指令値との比較により冷却開始位置 x_c , 到達時間 t_c , 張力が決定され, これを基に駆動装置 P_1 , P_2 間にある冷却装置と駆動装置 P_2 が制御可能となり, 鋼板を任意幅に調整制御できる。

次に, 提案した幅制御システムの設置位置を考える。本システムの利点の一つは工程の後半部に設置できることであるため, 途中工程までは統一幅にて製造し, 最終工程の近くで本システムにより大幅な幅変更が行える。そこで, 現在の熱延工程の設備を利用して図3のように設置すれば良い。既存の仕上圧延機

の後段に加熱設備と張力印可部を新設し, 冷却装置は既存のものを利用する, もしくは性能を現在のものよりも向上させることにより本研究で提案した幅制御システムを実現できる。しかし, 幅を調整した後に厚さ及び形状にも多少の影響が出ると考えられるので, これらを一定に調節する圧延機も新設する必要がある。このときの幅変化に関しては, 一般的に, 張力が $10[\text{kg}/\text{mm}^2]$ 以下の場合にはほとんど無視でき, また, $30 \sim 40[\text{kg}/\text{mm}^2]$ の大張力圧延の場合でも幅方向の変化は通常無視しているのが現状である。よって形状制御時の幅変化に関しては今後の考察とする。

4. 各制御系の設計

本システムを構成する具体的な各制御系及び設備の設計について述べる。

4.1 張力制御系

制御対象プロセスである張力発生系を図4に示す。

$\tau = D/v_{20}$, $\Delta\varepsilon = \Delta T/E$ とおくと張力発生方程式は

$$\tau \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = \frac{E}{v_{10}} \left(\Delta v_2 - \frac{v_{20}}{v_{10}} \Delta v_1 \right) \quad (16)$$

となる。ただし, Δv_1 , Δv_2 , ΔT : 各平衡点からの微小変化量, E : 鋼板のヤング率($2.06 \times 10^5 [\text{N}/\text{mm}^2]$), v_{10} , v_{20} : 基準ロール周速($1.5[\text{m/s}]$), D : スタンド間距離($2.5[\text{m}]$)である。

P_1 ロール周速 v_1 を一定であるとする, P_2 ロール周速 v_2 の変化量 Δv_2 から張力の変化量 ΔT への伝達関数は

Fig. 4 Tension generating mechanism

$$\frac{\Delta T}{\Delta v_2} = \frac{E}{v_{10}} \frac{1}{1+\pi s} = \frac{8.4}{s+0.6} \quad (17)$$

となる。これより、ILQ(Inverse Linear Quadratic)制御器⁹⁾¹⁰⁾を用いて張力制御系の応答が15~20[rad/sec]となるように設計した。

4.2 加熱設備に求められる性能¹¹⁾

4.2.1 電源周波数

今、鋼板の加熱には誘導加熱方式による加熱設備を用いることを考える。鋼板を被加熱物と考えると、鋼板中を流れる誘導電流は表面にもっとも強く発生し、内部へ浸透するにつれて指数関数的に減少するのが特徴で、この傾向は電源の周波数が高いほど顕著である(表皮効果)。

電流の計算を簡単にするため全電流が表面電流密度のまま一律な電流分布になって流れると仮定すると、この電流帯の幅 δ は理論的に次式で表される。

$$\delta = 5.03 \times 10^3 \times \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad [\text{cm}] \quad (18)$$

ただし、 ρ : 金属の固有電気抵抗[$\Omega \cdot \text{cm}$], μ_r : 比透磁率, f : 周波数[Hz]である。

今回、考える鋼板を幅1000[mm]×厚さ3[mm]として上下から加熱するので、浸透深さは1.5[mm]になる必要がある。よって式(18)より熱間処理であるから1000℃の鉄の場合、固有電気抵抗 ρ を 1.12×10^{-4} [$\Omega \cdot \text{cm}$](1000℃), 比透磁率 μ_r を1(鉄のキュリー温度770℃より), 浸透深さ δ を1.5[mm]とすると周波数 f は126[kHz]となる。

4.2.2 加熱装置の容量

図5のように、加熱装置をスタンドの前段に設置する場合を考える。

鋼板の速度を90[mpm](実機の1/10)とする。鋼板を1000℃か

Fig. 5 The example of heating equipment installation

Fig. 6 The spray arrangement in a cooling device

ら1200℃まで昇温するのに必要な単位体積あたりの熱量は、鉄の比熱を449[J/℃kg], 密度を 7.86×10^3 [kg/m³]とすると 7.06×10^8 [J/m³]となる。また、鋼板断面の寸法を1000[mm]×3[mm]とすると鋼板速度は1.5[m/sec]であるから、単位時間あたり 4.5×10^{-3} [m³]の鋼板が加熱装置の間を通過することになるので、加熱装置の処理能力は 4.5×10^3 [m³/sec]となる。以上のことから、加熱効率30%の加熱装置を2台使用する場合、1台あたり100℃昇温すればよいので、1台あたりの加熱装置に必要な容量 P は式(19)より5300[kW]となる。

$$P = \frac{(7.06 \times 10^8 / 2) \times (4.5 \times 10^{-3})}{0.3} \approx 5.3 \times 10^6 \quad (19)$$

4.3 冷却設備に求められる性能

図6で示す冷却装置においては、冷却スプレーを配置することで鋼板の周りの雰囲気温度を水温によって調節することができる。また、冷却開始時間はスプレーノズルの開閉パターンにより変更可能である。このようにして鋼板の周りの温度を下げたときの鋼板の中心温度及び表面温度の変化を調べる。1200℃の鋼板(熱伝導率:46[kcal/mh℃], 比重量:7830[kg/m³], 熱伝達率:350[kcal/m²h℃])が水スプレーによって雰囲気温度1℃まで冷却された装置内に入れられたとしたとき、 t [sec]後の鋼板の温度 θ は

$$\theta = 1200 - 100 \cdot t \quad [^\circ\text{C}] \quad (20)$$

で変化すると近似できる。

5. シミュレーション結果及び考察

各制御系及び加熱・冷却設備の性能が4節で述べたように設計されたとき、それらを組み合わせた熱間連続幅制御システムの幅変化を示し、その効果について考察する。

本研究で幅を変化させるのに必要な張力、幅変化挙動、加熱設備に必要な能力を検討した結果、高温・高歪速度による塑性変形を利用した幅制御方法は、図7のように雰囲気温度を制御することで板幅の変形を止める方法であることを示した。この方法は冷却位置の制御により板幅制御が可能であるので、張力の設定値を改めて調整する必要がないという利点がある。

Fig. 7 Width control equipment which stops modification using a cooling device

Fig. 8 The width change action by changing cooling start time

図 8 は幅制御システムを構成する制御系及び装置が 4 節で述べたように決定された場合、鋼板がスタンド間に入ってから 0, 0.5, 1.0 秒後から冷却を開始したときの板幅変化の様子である。この図より、冷却開始時間を遅らせたときの方が幅変化が進行しており、冷却開始時間を調整することで幅制御が可能であることが分かる。また冷却することにより幅が一定値に収束していることも読み取れる。なお、巻取り機の張力による影響は鋼板が冷却装置によって十分冷却されているためほとんど無視できると考えられる。

以上、新しい幅制御システムの検討を行い、シミュレーションにより本システムがオンラインで実現可能であることが示された。

6. 結 言

本稿で提案した新しいプロセスについて検討してきた結果、以下の成果が得られた。

- (1) 本研究に基づく実施例を示し、シミュレーションにより本研究で提案する絞り現象を利用した熱間連続幅制御方法が実現可能であるという見通しが得られた。
- (2) システムを構成する制御系の設計、装置の仕様設計では具体的な数値例を示し、実機化の方針を作成できた。特に張力制御系には ILQ 設計法を用い、設計の容易な保守性に優

れた制御系を設計することができた。

厚さ・形状調節圧延機については、実際に幅制御したのちの形状を観察してその性能を検討しなければならないので今後の課題とする。

今後は実験設備等による確性、実機化検討を推進したい。

参 考 文 献

- 1) 原川, 関口, 住谷, 今成, 歳弘, 安部: ホットストリップミルの交流電動機駆動による板厚精度の向上, 電学論 D, **115**, 4, (1995) 452.
- 2) 安部, 渡辺, 小林, 森高: ホットストリップミル仕上圧延機ルーパ高性能制御, 電学論 C, **107**, 9, (1987) 857.
- 3) 関口, 関, 安部, 福島, 辻, 上野: 熱間仕上圧延機のルーパ最適多変数制御, 電学論 C, **108**, 1, (1988) 31.
- 4) 石井, 高町, 小川, 山田, 濱渦: 熱延仕上圧延における板幅変化挙動, CAMP-ISIJ, **9**, 2, (1996) 300.
- 5) 村田, 東, 升田, 関根, 小倉: 熱延仕上ミルにおける板幅制御技術の開発, CAMP-ISIJ, **9**, 2, (1996) 308.
- 6) 佐々木, 河野, 伴, 阪上, 喜多: 熱延仕上圧延での板幅変化予測, CAMP-ISIJ, **9**, 2, (1996) 304.
- 7) 米田, 潮海, 岡田, 浦野, 星, 北浜: 熱間仕上げミルにおける高精度幅制御技術の開発, CAMP-ISIJ, **9**, (1996) 312.
- 8) 片山, 川口: 帯状金属の熱間連続幅制御方法, 特昭 55-64912 B21B 37/00, (1979).
- 9) 藤井, 下村: ILQ 最適サーボ系設計法の一般化, システム制御情報学会論文誌, **1**, 6, (1996) 194.
- 10) 大井, 西村, 柳多, 伴, 関: ILQ 設計理論に基づく冷間圧延機の高精度板厚制御, システム制御情報学会論文誌, **9**, 6, (1996) 274.
- 11) 市川, 稲垣, 岩本ら: 新版電気工学ハンドブック, 電気学会, (1997).